

实验研究

文章编号: 1671-251X(2010)06-0035-03

# 基于随机共振的瓦斯检测系统研究

孟秀峰<sup>1</sup>, 池继辉<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083;  
2. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:** 针对煤矿井下被检测信号中所含有的瓦斯浓度信息较为微弱的问题, 提出了一种基于随机共振的瓦斯检测系统的设计方案; 分析了随机共振的原理, 介绍了基于多层随机共振算法的瓦斯检测系统结构; 并以双层随机共振模型为例, 给出了该系统的仿真及数值分析。结果表明, 该系统能够避免煤矿井下噪声的影响, 获得较为准确的瓦斯浓度信息。

**关键词:** 矿井; 瓦斯检测; 微弱信号; 噪声; 随机共振; 信噪比

**中图分类号:** TD712.3 **文献标识码:** A

## Research of Gas Detection System Based on Stochastic Resonance

MENG Xiu-feng<sup>1</sup>, CHI Ji-hui<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering of CUMT. (Beijing), Beijing 100083, China.  
2. Faculty of Electrical and Control Engineering of Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** In view of the problem that gas concentration information in the detected signal of coal mine underground is weaker, the paper proposed a design scheme of gas detection system based on stochastic resonance. It analyzed principle of stochastic resonance, introduced structure of gas detection system based on multi-layer stochastic resonance algorithm, and gave simulation and numerical analysis by taking double-layer stochastic resonance model as example. The result showed that the system can be uninfluenced by underground noises and can get relatively accurate gas concentration information.

**Key words:** mine, gas detection, weak signal, noise, stochastic resonance, SNR

## 0 引言

煤矿井下环境较为复杂, 随机干扰因素很多, 噪声信息的介入, 导致被检测信号中所含有的瓦斯浓度信息较为微弱, 给井下瓦斯浓度的检测带来很大的不便, 引入随机共振检测技术可以解决这一问题。

## 1 随机共振的原理

随机共振的概念最初是在 1981 年由 Benzi 等

人在研究古气象冰川问题时提出的, 它描述了当系统的非线性与输入的信号和噪声之间存在某种匹配时, 输出信号的信噪比不仅不会降低, 反而会大幅度地增加, 出现了随机力和信号之间的协作效应。

随机共振的本质是由于输入信号、噪声和非线性系统的共同作用使部分噪声能量转换为信号能量。基于随机共振的弱信号检测技术与传统检测方法的区别在于它是利用噪声而不是消除噪声来达到信号检测的目的。因此, 随机共振现象在微弱信号检测方面有着独特的优势, 受到了广泛的关注。本文采用双层随机共振算法来提高瓦斯检测精度, 该算法根据信噪比最大值之间的差值来区分瓦斯气体的不同浓度。

判断一个系统是否达到随机共振, 大多采用信

收稿日期: 2010-02-07

作者简介: 孟秀峰(1963-), 男, 山西太原人, 副教授, 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院在读博士研究生, 主要研究方向为智能控制与检测。E-mail: mengxiufeng@163.com

噪比这个参数。信噪比的定义: 信号功率  $S$  与噪声功率  $N$  之比。设系统输入信号  $s(t) = A \sin(\omega t)$ , 根据信噪比的定义可得系统输出信噪比为

$$SNR|_{\text{dB}} = 10 \lg \frac{S(\omega_0)}{N(\omega_0)}$$

式中:  $S(\omega_0)$  为系统在输入信号频率  $\omega_0$  处的输出功率谱  $x(\omega)$  的幅值, 即有  $S(\omega) = |x(\omega)|$ ;  $N(\omega_0)$  为系统在频率  $\omega_0$  处的噪声谱。

随机共振模型一般包括 3 个要素: 非线性系统、输入信号和噪声。通常用于研究的随机共振系统都是由非线性朗之万 (Langevin) 方程描述的非线性双稳态系统所定义的:

$$\frac{dx}{dt} = ax - bx^3 + A \cos(2\pi f t + \Psi) + n(t) \quad (1)$$

式中:  $a, b$  为大于零的实常数;  $A \cos(2\pi f t + \Psi)$  为待测微弱信号,  $A$  为输入信号的振幅,  $f$  为输入信号的频率;  $n(t)$  为噪声, 且满足统计平均  $E[n(t)] = 0$ ,  $E[n(t)n(t+\tau)] = 2D\delta(t-\tau)$ ,  $D$  为噪声强度,  $2D$  为噪声方差,  $\tau$  为时间延迟。

最简单的非线性双稳态系统可以由  $u(x) = -\frac{1}{2}ax^2 + \frac{1}{4}bx^4$  表示。为了计算方便, 通常令初相  $\phi = 0$ , 则相应的势函数  $U(x, t) = -\frac{1}{2}ax^2 + \frac{1}{4}bx^4 - x[A \cos(\Omega t) + \xi(t)]$ 。非线性双稳态系统是一个非自激系统, 当信号幅值  $A$  和噪声强度  $D$  为零时, 有 2 个稳定状态  $x_m = \pm \sqrt{\frac{a}{b}}$  和 1 个不稳定状态  $x_b = 0$ , 如图 1 所示。

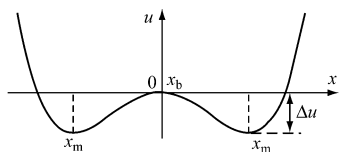


图 1 随机共振系统的对称双稳势阱曲线

在没有输入信号和噪声时 ( $A = 0, D = 0$ ), 势垒高度  $\Delta u = a^2/4b$ , 势能最小值位于  $x_m$  处, 此时随机共振系统的状态被限制在双势阱之一, 并由初始条件决定。当  $0 < A < (4a^3/27b)^{1/2}$  时, 两边的势能最小值开始相互转换, 势能以信号频率发生偏斜, 此时粒子在非平衡的双势阱中以  $f$  为频率局部地进行周期性运动, 但并不能越过势垒。当  $D \neq 0$  时, 发生了由噪声驱动的状态转换, 噪声强度越强, 转换速率越大。在  $A = 0$  的情况下, 转换速率由 Kramer 公式给出:

$$R = \frac{a}{\pi \sqrt{2}} \exp\left[-\frac{2\Delta u}{D}\right] \quad (2)$$

从式 (2) 可看出, 当势垒高度  $\Delta u$  取最小值时, 两势阱间的转换更为可能。

当输入噪声  $D$  达到某一值时, 由于噪声和输入信号的协同作用, 势阱倾斜程度越来越大, 粒子开始从原来的势阱跃迁到另一个势阱。由于双稳态之间的电压差远远大于输入信号的幅值, 使得输出信号幅值大于输入信号幅值, 起到了有效的放大作用, 这种现象就称为随机共振。

## 2 基于随机共振的瓦斯检测系统

### 2.1 多层随机共振算法

当基于随机共振的瓦斯检测系统对无法区分的放电电流的弱信号进行检测时, 如果信噪比曲线中的最大峰值仍然无明显差别, 也就是系统对微弱信号的增强还没有达到令人满意的效果, 为了进一步提高瓦斯检测能力, 可将随机共振系统进行多层级联, 通过随机共振系统一层一层地处理传递, 逐层增加弱信号的传输, 即将上一层随机共振系统的输出作为下一层随机共振系统的输入, 以进一步提高输出信噪比。多层随机共振算法结构如图 2 所示。

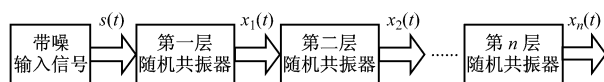


图 2 多层随机共振算法结构

以双层随机共振模型为例, 双层随机共振系统级联数学表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_1 - b_1 x_1^3 + s(t) \\ \dot{x}_2 = a_2 x_2 - b_2 x_2^3 + x_1(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $s(t) = A \cos(2\pi f t + \Psi) + n(t)$ 。

### 2.2 数值仿真及分析

图 3 为空气中瓦斯气体 (主要成分为甲烷) 的相对体积百分数为 1.0% 和 1.6% 的 2 条电流曲线, 显然这 2 条电流曲线在时域上完全无法分辨。

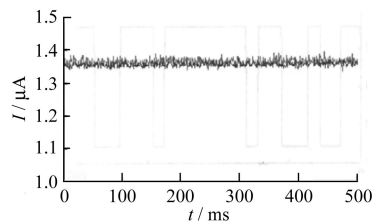
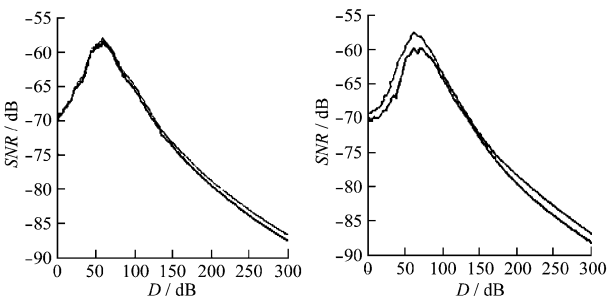


图 3 空气中瓦斯气体的相对体积百分数为 1.0% 和 1.6% 的 2 条电流曲线

取式 (3) 中的参数  $a_1 = 4, b_1 = 16$ , 输入信号幅值

$A = 0.3$ , 采样频率  $f_s = 500\text{ Hz}$ , 现让  $s(t)$  通过第一层随机共振器, 输出信噪比曲线如图 4(a) 所示。从图 4(a) 可看出, 二者的差别还不是很大。取参数  $a_1 = 1, b_1 = 1, x_1(t)$  进入第二层随机共振器, 输出信噪比曲线如图 4(b) 所示。



(a) 通过第一层随机共振器 (b) 通过第二层随机共振器

图 4 信噪比与噪声强度的关系曲线

对比图 4(a)、(b) 可看出, 通过第二层随机共振器后, 2 条信噪比曲线的峰值差别比较明显, 可以很好地分辨出来。其中峰值高的曲线对应的瓦斯气体

的相对体积百分数为 1.6%, 峰值低的曲线对应的瓦斯气体的相对体积百分数为 1.0%。可见采用 2 层或多层随机共振系统级联方式, 能够提高基于随机共振的瓦斯检测系统的检测精度。

表 1 给出了瓦斯气体在空气中的相对体积百分数为 1.0% 和 1.6% 时经过两层随机共振器后得到的信噪比及其差值对比。表 1 中每组信噪比的最大值都是经过 100 次平均所得, 对每组信噪比之差求平均值得到  $\bar{\sigma} = 1.689\,02\text{ dB}$ , 每组的信噪比的差值与  $\bar{\sigma}$  的误差不超过 0.015 72 dB。也就是说在一定的误差范围内, 最大信噪比之差基本为一个定值。这就提供了一个思路: 应用含有不同瓦斯浓度信息的电流信号的输出信噪比最大值之间的差值可识别不同浓度的瓦斯气体。在瓦斯气体与空气的混合气体中, 设检测的瓦斯气体在空气中的相对体积百分数为 1.0% 时的信噪比最大值为  $x\text{ dB}$ , 那么瓦斯气体在空气中的相对体积百分数为 1.6% 时所对应的信噪比最大值为  $x + 1.689\,02\text{ dB}$ 。

表 1 不同浓度的瓦斯气体经过 2 层随机共振器后得到的信噪比及其差值对比

	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	第六组	第七组	第八组	第九组	第十组
1.0%	-60.913 4	-60.956 1	-60.539 3	-61.028 0	-60.940 2	-60.370 8	-60.412 3	-61.200 1	-60.899 1	-61.083 2
1.6%	-59.223 7	-59.259 1	-58.866 0	-59.328 2	-59.341 4	-58.673 2	-58.737 0	-59.513 5	-59.212 0	-59.396 3
SNR 之差	1.689 7	1.697 0	1.673 3	1.699 8	1.684 5	1.697 3	1.676 2	1.686 6	1.688 9	1.696 9

3 结语

将随机共振理论运用到煤矿井下瓦斯检测系统中, 经过仿真和数值分析可以看出, 该系统能够避免井下噪声的影响, 获取较为准确的瓦斯浓度信息, 为瓦斯检测领域的研究提出了一种新的方向。

参考文献:

[1] 杨祥龙, 汪乐宇. 随机共振技术在弱信号检测中的应用[J]. 电路与系统学报, 2001, 6(2): 94-97.

[2] 刘 军. 传感器阵列中阈上随机共振现象的仿真研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(3): 854-857.

[3] SASAKI H, SAKANE S, ISHIDA T, et al. Suprathreshold Stochastic Resonance in Visual Signal Detection[J]. Behavioural Brain Research, 2008, 193: 152-155.

[4] 冷永刚, 王太勇. 二次采样用于随机共振从强噪声中提取弱信号的数值研究[J]. 物理学报, 2003, 52(10): 2432-2437.

[5] 周关林, 李钢虎, 成 静. 随机共振在水声信号检测中的应用[J]. 计算仿真, 2009, 26(10): 337-339.

[6] 李 强, 王太勇, 冷永刚, 等. 基于变步长随机共振的弱信号检测技术[J]. 天津大学学报, 2006, 36(4): 432-437.

DDSF1352 电能表获上海市 2010 年度重点新产品证书

2010 年 3 月, 上海安科瑞电气股份有限公司研制的 DDSF1352 单相电子式复费率电能表被评为上海市重点新产品, 并荣获上海市科学技术委员会颁发的上海市重点新产品证书(编号为 10XP0524000)。

该电能表采用 DIN35 mm 轨道安装, 宽度与微型断路器匹配, 为 4 个模数, 一次接入最大电流为 20(80) A, 可方便地安装于照明箱内, 支持 Modbus 协议或 DL/T 645 规约, 配备有安科瑞系统集成软件。该电能表为大型楼宇电能分项计量及客户实现低压终端电能管理提供了理想的方案。

(王甜慧)